



« FORMATION D'ÉTOILES, DES PETITES AUX GRANDES ÉCHELLES »

Conférence débat organisée par Catherine CESARSKY & Pierre ENCRENAZ,
Membres de l'Académie des sciences
David ELBAZ & Philippe ANDRÉ, CEA Saclay

Mardi 1^{er} avril 2014 de 14h30 à 17h30

Académie des sciences – Grande salle des séances
23 quai de Conti, Paris 6^e

La formation des étoiles est l'un des phénomènes les plus fondamentaux en astrophysique. L'étude des mécanismes physiques responsables de la formation stellaire dans l'univers est importante, non seulement pour comprendre l'origine de notre propre soleil, mais aussi en raison de liens profonds avec la formation des systèmes planétaires aux petites échelles et avec l'évolution des galaxies aux grandes échelles.

Le problème est très complexe car il met en jeu un grand nombre d'effets physiques (gravité, turbulence et magnétisation du milieu interstellaire, phénomènes de rétroaction, thermodynamique du gaz interstellaire) sur une grande gamme d'échelles (plus de 20 ordres de grandeur en densité, plus de 11 ordres de grandeur en échelles spatiales). En dépit de cette complexité, les produits globaux du processus de formation stellaire, comme la distribution en masse des étoiles ou le taux de formation d'étoiles dans les galaxies, semblent régis par des lois assez simples et quasi-universelles. Stimulée par des progrès récents, résultant notamment d'observations avec l'observatoire spatial Herschel, cette rencontre permettra de faire le point sur notre compréhension actuelle et de s'interroger sur l'universalité du mécanisme de formation des étoiles et ses causes possibles.

14h30 Introduction

Catherine CESARSKY, *Membre de l'Académie des sciences – CEA Saclay*

14h45 Universalité de la formation des étoiles dans les filaments

Philippe ANDRÉ, *CEA Saclay*

15h15 Formation d'étoiles induite

Annie ZAVAGNO, *Laboratoire d'Astrophysique de Marseille*

15h30 ALMA et formation d'étoiles massives

Nicolas PERETTO, *Université de Cardiff, Royaume-Uni*

15h50 Théorie et simulations numériques de la formation des étoiles dans le milieu interstellaire

Patrick HENNEBELLE, *Ecole Normale Supérieure & Observatoire de Paris, CEA Saclay*

16h20 Universalité de la formation d'étoiles dans les galaxies dans la toile cosmique

David ELBAZ, *CEA Saclay*

16h50 Discussion générale

Françoise COMBES, *Membre de l'Académie des sciences, Observatoire de Paris*

17h15 Conclusion

Pierre ENCRENAZ, *Membre de l'Académie des sciences, Observatoire de Paris*



Universalité de la formation des étoiles dans les filaments

Philippe ANDRÉ, CEA Saclay

L'Observatoire spatial Herschel a fourni, entre fin 2009 et début 2013, des images du ciel d'une finesse inégalée, de l'infrarouge lointain au submillimétrique. Il a permis des avancées très significatives dans notre compréhension du lien entre la structure du milieu interstellaire et le processus de formation stellaire.

Dans tous les nuages moléculaires proches de notre Galaxie, les images obtenues avec Herschel révèlent une profusion de filaments ainsi que de nombreux cœurs denses "pré-stellaires" situés le long des filaments. Ces filaments ont tous une largeur très similaire de l'ordre de ~ 0.1 pc ou ~ 0.3 année-lumière mais seuls les plus denses contiennent des cœurs pré-stellaires, les germes de futures étoiles.

Les résultats des études conduites avec Herschel suggèrent un scénario dans lequel les filaments interstellaires et les cœurs pré-stellaires représentent deux étapes clés du processus de formation stellaire : dans un premier temps, la turbulence magnétohydrodynamique (MHD) à grande échelle génère des structures filamentaires dans le milieu interstellaire ; dans un deuxième temps, les filaments les plus denses se fragmentent en cœurs pré-stellaires (qui s'effondrent eux-mêmes rapidement en protoétoiles) par instabilité gravitationnelle. Ce scénario permet de rendre compte au moins en partie de l'inefficacité de la formation des étoiles, de la masse caractéristique des étoiles - proche de celle du Soleil- et du taux global de formation stellaire dans les galaxies.

Formation d'étoiles induite

Annie ZAVAGNO, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Les étoiles massives jouent un rôle majeur dans l'évolution des galaxies. Pourtant les mécanismes qui conduisent à leur formation sont encore mal compris. Ces étoiles sont rares et évoluent rapidement ce qui complique l'étude des phases précoces de leur formation. Ces étoiles émettent un fort flux ionisant et forment des régions d'hydrogène ionisé (régions HII) qui sont en expansion supersonique dans le milieu environnant. Sous certaines conditions cette expansion favorise la formation d'une nouvelle génération d'étoiles, dont des étoiles de forte masse. La bordure des régions HII devient donc un lieu privilégié pour l'étude de la formation des étoiles massives. Je présenterai ce phénomène de formation stellaire induite et l'état actuel de nos connaissances dans ce domaine. Je montrerai en particulier comment ce thème nous ouvre de nouvelles perspectives dans l'étude de la formation des étoiles massives.



ALMA et la formation des étoiles massives

Nicolas PERETTO, *Université de Cardiff, Royaume-Uni*

En raison de leur grande luminosité et vents puissants, les étoiles massives jouent un rôle prépondérant dans l'évolution des galaxies. Ces étoiles sont au moins dix fois plus massives que le Soleil et malgré leur importance, le processus menant à leur formation est encore très peu compris. La principale difficulté est observationnelle : les régions de formation d'étoiles massives sont rares et donc, afin de les étudier en détail, il est nécessaire de sonder de grands volumes de la galaxie tout en conservant la meilleure résolution angulaire possible. Le tout nouvel interféromètre submillimétrique ALMA est l'instrument idéal pour surpasser cette difficulté et percer les secrets de la formation des étoiles massives.

Les étoiles massives, comme les étoiles de tous types de masses, se forment dans les régions les plus froides de la galaxie, au sein de larges nuages de gaz moléculaire. Ces nuages sont très souvent fragmentés en un ensemble de structures denses et compactes appelées cœurs, précurseurs directs d'étoiles individuelles. L'observation de l'un de ces nuages avec ALMA a révélé la présence de l'un des cœurs les plus massifs recensés à ce jour dans la Voie Lactée. Ces observations montrent que ce cœur, situé au centre du puits gravitationnel du nuage, s'est formé par effondrement du nuage dans sa globalité, et non seulement par contraction d'un petit fragment de ce nuage comme il est généralement admis pour la formation des étoiles de type solaire. Dans le contexte d'un processus universel, cette différence entre formation d'étoiles de petite masse et formation d'étoiles de grande masse pourrait s'expliquer par une importance croissante de la dynamique à grande échelle des nuages.

Théorie et simulations numériques de la formation des étoiles dans le milieu interstellaire

Patrick HENNEBELLE, *Ecole Normale Supérieure & Observatoire de Paris, CEA Saclay*

La formation des étoiles est l'une des étapes fondamentales de l'histoire de notre univers. En effet ces dernières jouent un rôle déterminant pour l'évolution des galaxies mais également pour la formation des planètes. La compréhension de ce processus constitue un défi considérable. En effet, le cycle de la matière interstellaire qui régule la formation des étoiles implique une dynamique d'échelles spatiales et temporelles qui s'étend sur près de 10 ordres de grandeur ainsi que des densités variant de plus de 25 ordres de grandeurs. Par ailleurs, de très nombreux processus physiques tels que la turbulence magnétohydrodynamique, la gravité, le rayonnement cosmique ou encore la physique atomique et moléculaire, y sont à l'œuvre.

L'avènement conjoint des grands télescopes et des supercalculateurs massivement parallèles a permis néanmoins d'effectuer récemment des progrès importants, tant pour la compréhension de la problématique astrophysique que pour celle des processus physiques mis en œuvre. Plusieurs étapes clés seront décrites à l'aide des simulations numériques et des théories analytiques développées en parallèle. La confrontation entre les prédictions des simulations et des observations sera illustrée sur



quelques exemples.

Universalité de la formation d'étoiles dans les galaxies dans la toile cosmique

David ELBAZ, CEA Saclay

La position et la morphologie des galaxies à l'intérieur des grandes structures de l'univers sur des échelles de plusieurs millions d'années-lumière reflètent l'histoire de plus de 13 milliards d'années d'un combat entre la gravité et la physique complexe des systèmes autogravitants.

On pensait que la formation d'étoiles dans les galaxies était largement conditionnée par une formation hiérarchique des structures où les rencontres de galaxies provoquaient des flambées de formation d'étoiles, mais les observations récentes avec au premier plan le satellite Herschel ont dévoilé une universalité insoupçonnée de la croissance des galaxies au cours du temps. On a ainsi découvert que le rythme auquel les étoiles naissent dans les galaxies était proportionnel à leur masse, l'influence des rencontres de galaxies jouant un rôle mineur sur ce rythme dans l'univers lointain. On parle aujourd'hui d'une séquence principale des galaxies par analogie avec la séquence principale des étoiles, car les galaxies passent la majorité de leur existence dans ce mode d'évolution. Ce mode universel de formation d'étoiles semble prendre sa source dans l'apport continu de matière intergalactique dans les galaxies, tandis que l'effet rétroactif du rayonnement des étoiles, des explosions de supernovas et de l'accrétion par les trous noirs super massifs combiné avec la turbulence générée par la dynamique du gaz régulent la circulation des réservoirs de matière nécessaires à la formation d'étoiles.